

TARTU ÜLIKOOL  
LOODUS- JA TEHNOLOOGIA TEADUSKOND

Füüsika Instituut

Kerli Prants

**TARTU OBSERVATOORIUMI KAJAVABA KAMBRI  
KALIBRATSIOONIMÕÕTMISED**

Magistritöö (30 EAP)

Juhendajad: Viljo Allik MSc

Mart Noorma PhD

Tartu 2015

## Sisukord

1.	Kasutatud lühendid .....	3
2.	Sissejuhatus .....	4
3.	Ülevaade elektromagnetilise ühilduvuse olemusest .....	5
	Tähtsamad mõisted .....	5
	Valdkonna tähtsamad regulaatorid <sup>[1]</sup> .....	5
	Tähtsamad ühikud ja nendevahelised seosed .....	6
4.	Elektromagnetilise ühilduvuse testimine .....	9
	Kajavaba kamber .....	9
	Testi protseduur .....	10
	Elektromagnetvälja tugevuse kalibratsioonimeetodid <sup>[6]</sup> .....	11
5.	Katsete läbiviimine Tartu Observatooriumis .....	12
	Kasutatud seadmed .....	12
	Kajavaba kamber .....	14
	Katse ülesehitus .....	15
	Katsetingimused .....	17
6.	Tulemused .....	19
	Välja homogeensus .....	22
	• HF907 .....	22
	• HL562 .....	24
	Antennide kalibreerimine .....	26
	Mõõtevigade suurusjärgud .....	28
7.	Arutelu .....	30
8.	Kokkuvõte .....	31
9.	Tänuõnad .....	32
10.	Kasutatud kirjanduse loetelu .....	33
11.	Anechoic chamber calibration in Tartu Observatory .....	35

## 1. Kasutatud lühendid

B	Bell
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i> (Euroopa Elektrotehnika Standardimiskomitee)
CISPR	<i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i> ( <i>International Special Committee on Radio Interference</i> ) (Rahvusvaheline Raadiohäirete Erikomitee)
cm	Sentimeeter
dB	Detsibell
dBm	Detsibell-millivatt
dB $\mu$ V, dBuV	Detsibell-mikrovolt
dB $\mu$ V/m	Detsibell-mikrovolti meetrile
dBV	Detsibell-volt
dBW	Detsibell-vatt
EAP	Euroopa Ainepunkt
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
EMÜ	Elektromagnetiline Ühilduvus
GHz	Gigaherts
Horisontaalpol.	Horisontaalpolariseeritud (signaal)
HVA	Homogeense Välja Ala
Hz	Herts
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Rahvusvaheline Elektrotehnika Komisjon)
kHz	Kiloherts
m	Meeter
MHz	Megaherts
mW	Millivatt
mW/m <sup>2</sup>	Millivatti ruutmeetritele
RF	<i>Radio Frequency</i>
R&S	Rohde & Schwarz
st	See tähendab
TO	Tõravere Observatoorium
UCC	<i>Ultra Compact Chamber</i>
UFA	<i>Uniform Field Area</i>
V	Volt
Vertikaalpol.	Vertikaalpolariseeritud (signaal)
V/m	Volti meetrile
W/m <sup>2</sup>	Vatti ruutmeetritele

Tabel 1: Tähistete ja lühendite loetelu.

## Sissejuhatus

Tehnoloogia kiire areng võimaldab inimestel end aina enam ümbritseda erinevatest igapäevaelu lihtsustavatest elektroonikaseadmetest. Paraku kiirgavad nad kõik vähemal või rohkemal määral elektromagnetkiirgust, mis võib häirida teiste seadmete tööd või kahjustada tervist. Elektromagnetiliseks ühilduvuseks (EMÜ) nimetatakse seadmete omadust talitleda häireteta elektromagnetilises keskkonnas ilma teisi seadmeid ja elusorganisme segamata. EMÜ testimiseks ehitatakse niinimetatud kajavabasid kambreid, mis neelavad elektromagnetkiirgust ja seega saab neis läbi viia täpseid teste elektromagnetilise emissiooni ja vastuvõtlikkuse uurimiseks.

Üks selline kamber paigaldati ka Tartu Observatooriumi (TO) ning sellega on edaspidi plaanis toetada nii asutuse enda teadustööde läbiviimist kui ka pakkuda firmadele EMÜ testide teenust. Eelnevalt tuleb aga olla kindel, et läbi viidavad mõõtmised on täpsed ja tulemused vastavad laiemalt tunnustatud standardile.<sup>[6]</sup>

TO kajavaba kamber peaks vastama Rahvusvahelise Elektrotehnika Komisjoni standardile 61000-4-3, seetõttu on see dokument käsolevas töös lähteallikaks testide läbiviimise tingimuste määramisel ja tulemuste hindamisel. Käesoleva magistritöö raames tegeleti TO kambri testimisega, valmistamaks seda ette edaspidisteks EMÜ eksperimentideks.

Töö eesmärkideks on:

- Kajavaba kambri testimine – kontrollida, kas elektromagnetvälja homogeensus mõõtekambris vastab tootja poolt kinnitatud parameetritele
- Antennide HL562 ja HF907 kalibreerimine
- Antenni asukoha mõju analüüs mõõtetulemustele.

Elektromagnetilise keskkonnaga seotud uuringud on Tartu Ülikooli keskkonnatehnoloogia erialal tavapärasest erinev uurimissuund ja varem pole sarnasel teemal uurimistöid kirjutatud. Tegu on perspektiivika ja kiiresti areneva valdkonnaga, mis on oluline elukeskkonna ohutuse tagamises tänapäeva tehnoloogia arengule suunitletud ühiskonnas.

Töös antakse ülevaade EMÜ valdkonna arengust ja tähtsamatest mõistetest ning tutvustatakse EMÜ testide protseduuri. Praktilises osas kirjeldatakse sooritatud katseid ning analüüsitakse tulemusi. Peamiseks eesmärgiks on välja selgitada, kas uuritavas kajavabas kambris on võimalik läbi viia rahvusvahelisele standardile vastavaid teste.

## 2. Ülevaade elektromagnetilise ühilduvuse olemusest

### Tähtsamad mõisted

Elektromagnetiline keskkond on ajas muutuv elektromagnetiliste nähtuste kogum mingis kindlas kohas. Elektromagnetiliseks ühilduvuseks (EMÜ) (*electromagnetic compatibility – EMC*) nimetatakse süsteemi või seadme võimet talitleda rahuldavalt teda ümbritsevas keskkonnas, ilma teisi ümbritsevaid seadmeid ja elusolendeid häirimata. Elektromagnetilise häiringu (*disturbance*) all mõeldakse elektromagnetilist nähtust, mis halvendab süsteemi talitlust või mõjub kahjustavalt elus või elutule ainele. Selliseks häiringuks võib olla elektromagnetiline müra, soovimatu signaal või levikeskkonna omaduste muutumine. EMÜ jaotub elektromagnetiliseks emissiooniks ja tundlikkuseks. Mõlemad omadused on olemas igal elektroonikaseadmel. Emissioon võib olla nii tahtlik (näiteks signaaliedastusseadmetel) kui tahtmatu (tegevuse kõrvalproduktina eralduv). Seadmed peavad olema väliste häiringute kindlad ja ei tohi ka ise genereerida lubamatuid häiringuid.<sup>[1]</sup>

Elektromagnetiliselt ühilduvate seadmete arendamise kolm peamist võtet on: häiringu mahasurumine tekkeallikas, elektromagnetilise sidestuse vähendamine (häiringu leviku takistamine) ja tundliku seadme kaitsmine (häiringukindluse tõstmine).<sup>[1,2]</sup>

Elektroonikatootjad peavad tagama oma toodete elektromagnetilise ühilduvuse toote kasutuskeskkonnaga. Eelkõige on tähtis ohutus – toode ei tohi olla ohtlik ümbritsevale elusale ega elutule keskkonnale. Mitmetes riikides on kehtestatud kindlad standardid, millele sealsel turul müüdavad tooted peavad vastama. Samuti on tootja enda maine hoidmiseks vajalik, et toode töötaks häireteta.<sup>[2]</sup>

### Valdkonna tähtsamad regulaatorid<sup>[1]</sup>

EMÜ-le hakati tähelepanu pöörama juba 20. sajandi esimeses pooles, kui raadiosageduslike signaalide (raadio, televisioon) edastust hakkas häirima elektromagnetiline müra. Loodi esimesed uurimiserühmad ja töötati välja mõõteseadmed. 1933. aastal moodustati Pariisis Rahvusvaheline Raadiohäirete Erikomitee (CISPR). Peale Teist maailmasõda muutus CISPR Rahvusvahelise Elektrotehnika Komisjoni IEC erikomiteeks. CISPR-i väljaannetesse koondati erinevad elektromagnetiliste häiringute mõõtemetoodikad, soovitatavad lubatavad piirväärtused, erinevate seadmestikkude kirjeldused ja palju muud sarnast. Loodi ülemaailmselt tunnustatud standardid, et ühtlustada ja reguleerida elektromagnetilist keskkonda. Tehnoloogia arengu tõttu hakkas

sellesse lisanduma aina rohkem erinevaid elektroonilisi seadmeid, mis kõik pidid kõrvuti talitlema. 1973. aastal alustas tööd Euroopa Elektrotehnika Standardimiskomitee CENELEC.

Sagedusala nimetus	Inglise keeles	Ingl. k. lüh.	Sagedus
väga madalad sagedused	<i>very low frequencies</i>	VLF	3-30 kHz
madalsagedused	<i>low frequencies</i>	LF	30-300 kHz
kesksagedused	<i>medium frequencies</i>	MF	300 kHz - 3 MHz
kõrgsagedused	<i>high frequencies</i>	HF	3-30 MHz
väga kõrged sagedused	<i>very high frequencies</i>	VHF	30-300 MHz
ultrakõrgsagedused	<i>ultra high frequencies</i>	UHF	300 MHz - 3 GHz
ülikõrgsagedused	<i>super high frequencies</i>	SHF	3-30 GHz
eriti kõrged sagedused	<i>extra high frequencies</i>	EHF	30-300 GHz

Tabel 2: Raadiotehnikas ja IT-s kasutatav el. m. kiirguste spekter.<sup>[1]</sup>

Häiringud sagedusega 150 kHz – 30 MHz levivad peamiselt juhtivuslikul teel mööda seadmete ühendusi. Alates sagedusest ~20 GHz levivad häiringud ka kiirguslikul teel.

Elektrit tarbivad majapidamisseadmed tekitavad peamiselt suhteliselt madala sagedusega kiirgust (kuni 1 MHz); kuvarid ja valveseadmed tekitavad keskmise sagedusega häiringuid (300 Hz – 10 MHz) ning raadio, televiisor, mobiiltelefonid ja mikrolaineahjud nn raadiosageduslikke häiringuid (*radio frequency – RF*), mille vahemik on 10 MHz – 30 GHz. Kommunikatsiooniseadmed kiirgavad tahtlikult välja elektromagnetlaineid ja seega on oluline kindlustada nii nende omavaheline ühilduvus kui ka ohutus elusorganismidele. Käesolevas töös läbiviidud katses uuriti sagedusvahemikku 30 MHz – 3 GHz.

### Tähtsamad ühikud ja nende vahelised seosed

Raadiosagedustel (RF) mõõdetakse elektri- ja magnetvälja tugevust enamasti voltides meetri kohta (V/m). Praktikas ja ka käesoleva uurimistöö mõõtmiste puhul on väljatugevuse mõõtmiseks enamasti kasutuses väiksem ühik  $\mu\text{V/m}$ .<sup>[1]</sup>

Bell (B) on dimensioonitu logaritmiline mõõtühik, mis võrdub füüsikalise suuruse väärtuse ja samanimelise lähtesuuruse väärtuse suhte logaritmiga. Logaritmilist skaalat kasutatakse näiteks väga suurte muutujavahemike puhul ning erinevate suurusjärkude võrdlemisel. Praktikas kasutatakse bellist kümme korda väiksemat ühikut - detsibelli (dB). Detsibelli kombineeritakse mingite teiste baasühikutega, näiteks voltide või vattidega, luues logaritmilised ühikud detsibell-volt (dBV) ja detsibell-vatt (dBW).<sup>[3]</sup>

dBm on detsibell-millivatt, elektrilise võimsuse (tähis N või P) ühik detsibellides. Võimsus detsibell-millivattides võrdub kümnekordse kümnendlogaritmiga võimsusest millivattides (valem 1).

$$P_{(dBm)} = 10 * \log_{10}\left(\frac{P_{(mW)}}{1mW}\right) \quad (1)$$

Detsibell-millivattide nivoo referentsväärtuseks on võetud 1 mW, see tähendab, et 1 mW = 0 dBm. 1 W võrdub seega 30 dBm.<sup>[3]</sup>

dBV on detsibell-volt, pinge ühik detsibellides, aga selle asemel on sagedamini kasutuses väiksem ühik dBμV (detsibell-mikrovolt). Eesliite mikro- lühendi (μ) sisestamine mõnedes virtuaalkeskkondades on keeruline ja mugavuse huvides kasutatakse kreeka tähe asemel ladina tähte "u", näide: dBuV.

Detsibell-millivoldi ja detsibell-millivati teisendamine logaritmilistest lineaarseteks ühikuteks käib vastavalt valemitega 2 ja 3:

$$U_{(V)} = 10^{\frac{U_{(dBuV)} - 120}{20}} \quad (2)$$

$$P_{(W)} = 10^{\frac{P_{(dBm)} - 30}{10}} \quad (3)$$

dBm ja dBμV omavaheline suhe on esitatud valemiga 4:

$$U_{dBuV} = 90 + 10 * \log(Z) + P_{dBm} \quad (4)$$

kus U on elektrivälja tugevus ühikutes dBμV; Z on süsteemi komplekstakistus oomides (Ω) (töös sooritatud katsete ajal oli see väärtus konstantselt 50 Ω) ja P on võimsuse tihedus dBm ühikutes.<sup>[4]</sup>

Antenni faktor ( $A_F$ ) on antenni kirjeldav parameeter, mis väljendab mingi väljatugevuse ja selle poolt antenni otstel tekitatud pinge väärtuse seost, ehk siis see näitab, kui suurt väljatugevust on vaja, et tekitada antennis pinget 1 V.

$$A_F = \frac{E}{U} \quad (5)$$

Antenni faktor (ühik  $\text{m}^{-1}$ ) arvutatakse valemist 3, kus: E on elektrivälja tugevus (V/m) ning U on pinge (V).<sup>[5]</sup>



### 3. Elektromagnetilise ühilduvuse testimine

#### Kajavaba kamber

Elektroonikaseadmete tootjate huvides on, et nende tooted ei kujutaks ohtu teistele seadmetele ja elusorganismidele ega saaks kahjustada ümbritsevatest elektromagnetväljadest. Seetõttu viiakse läbi EMÜ teste. Testi käigus mõõdetakse nii seadme enda poolt välja kiiratavat elektromagnetkiirgust kui ka jälgitakse selle käitumist välises elektromagnetväljas. Ideaalne testkeskkond oleks täielikult kajavaba, st täiesti lage väli, kus ei ole ühtegi kõrvalist objekti, millelt võiks tekkida elektromagnetkiirguse peegeldus. Samuti ei tohi läheduses olla ühtegi seadet, mis võiks kõrvalist kiirgust tekitada või testi käigus kasutatavast kiirgusest kahjustatud saada. Sama käib elusorganismide kohta, kellele peab katse ohutu olema. Keskkonnatingimused, nagu temperatuur ja õhuniiskus ei tohi segada katse läbiviimist (näiteks niiskuse katseobjektidele kondenseerumise kaudu)<sup>[6]</sup>. Tegelikuses on sellist looduslikku keskkonda väga keeruline leida, seetõttu ehitatakse kajavabasid kambreid (kasutatakse ka nimetusi: (pool)neeldumiskamber, vähepeegeldav ruum), kus on tehislikult loodud vastavad tingimused.<sup>[1]</sup>

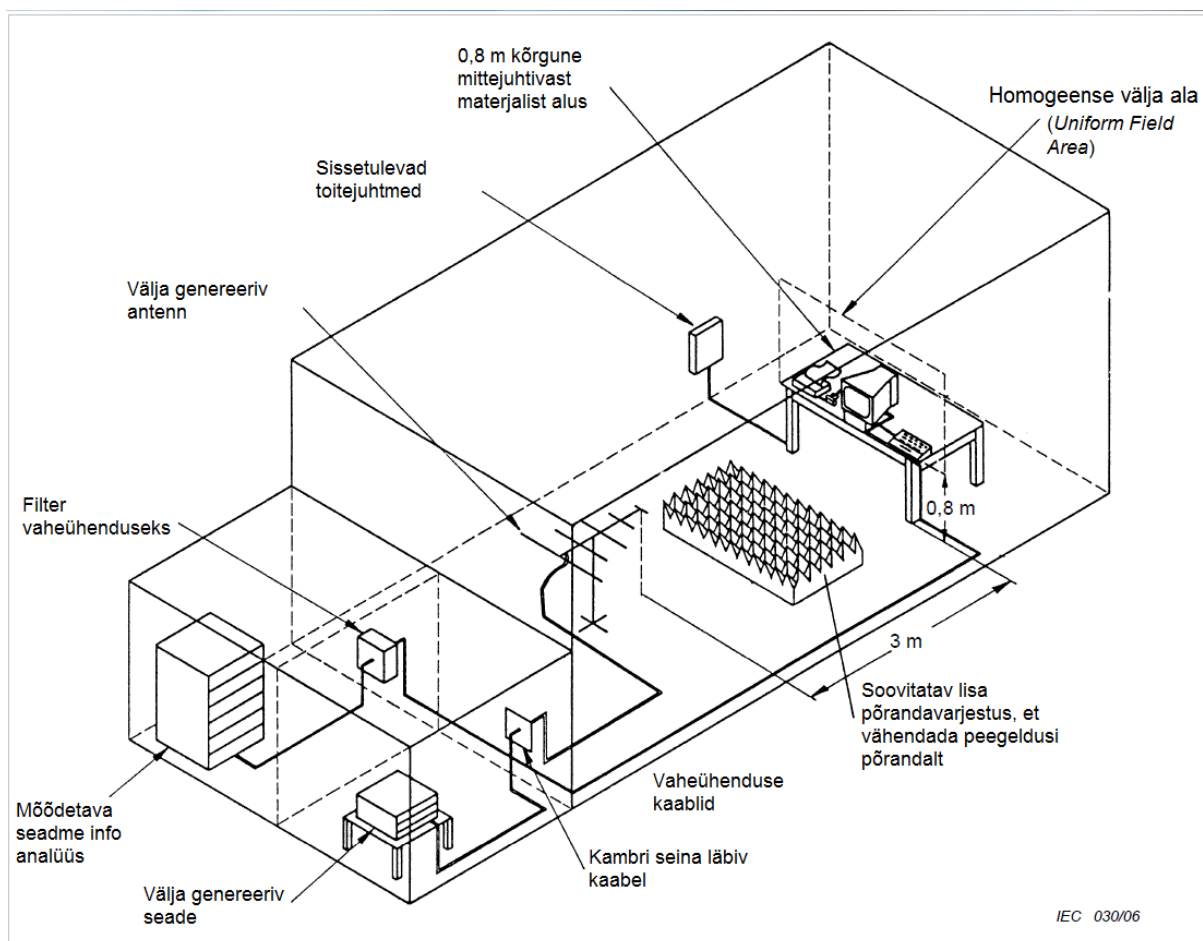
Kajavaba kambri seinad ja lagi on kaetud elektromagnetkiirgust neelava materjaliga. Täielikult kajavabas kambri (*fully anechoic chamber*) on ka põrand kogu ulatuses kaetud kiirgust neelava materjaliga ning vajadusel on põranda kohale paigaldatud võre, mille peal saab testitavaid objekte liigutada. Niinimetatud osaliselt kajavabas kambri (*semi anechoic chamber*) on põrand katmata või osaliselt kaetud teisaldatavate või statsionaarsete neelava materjali plokkidega.<sup>[6,7]</sup>

Ferriitneelajad töötavad hästi kuni sageduseni 1 GHz. Kõrgematel sagedustel võivad nad käituda hoopis peegeldajatena ja seega on suurtes kambrites ja pikkade vahemaade tagant keeruline tagada standardile vastav homogeenne väli. Kõrgema sagedusega kiirguse neelamiseks kasutatakse süsinikupõhisest vahtmaterjalist püramiidabsorbereid, mille kuju aitab kaasa kiirguse neelamisele (sarnanedes helilaineid summutavatele konstruktsioonidele akustilises kajavabas kambri). Välja on arendatud ka hübriidabsorberid, mis kombineerivad omavahel ferriidi ja vahtmaterjalist koonused. Väikestes kambrites määravad absorberite valiku enamasti ruumi füüsilised mõõtmed, püramiidabsorberid võivad võtta väga palju ruumi, samas, kui ferriitabsorberid on väga õhukesed ja osutuvad tihtipeale esimeseks valikuks ruumi katmisel.<sup>[8,9]</sup>

Ferriitabsorberitega kaetud ruumi absorbeerivate omaduste suurendamiseks on soovitatav:

- kasutada antenne, mis kiirgavad võimalikult otsesuunas ja kitsasse ruuminurka (näiteks ruuporantennid), et vähendada võimalike peegelduste hulka;
- lühendada antenni ja testobjekti vahelist kaugust, vähendamaks peegeldusi kambri seintelt. Vähim lubatud kaugus on 1 m;
- paigaldada kambri tagaseina süsinikupõhisest materjalist lisaneelajaid, mis vähendavad otseste peegelduste hulka.<sup>[6]</sup>

## Testi protseduur



Joonis 1: EMÜ testi skeem.<sup>[6]</sup>

Joonisel 1 on kujutatud näide kajavabas kambris sooritatavast EMÜ testist. Joonise arusaadavuse huvides ei ole kujutatud põrandat ja lage katvat varjestust. Joonisel on näha signaaligeneraator (välja genereeriv seade), mis saadab signaali kambris asuvasse antenni. Antenn on suunatud testitavale seadmele, mis asub homogeense välja alas (HVA, ingl. k. *UFA*). Testitava seadme erinevaid parameetreid mõõdetakse teatud tugevusega elektromagnetväljas töötades, et näha, kas ja millisel moel häirib väline kiirgus seadme funktsionaalsust.

## Elektromagnetvälja tugevuse kalibratsioonimeetodid<sup>[6]</sup>

Homogeense välja alaks loetakse saateantenni suunaga risti asetsevat kindla pindalaga piirkonda ruumis, mille erinevates punktides signaali võimsuse väärtuste vahe ei tohi olla suurem kui 6 dB. Rahvusvahelisele IEC standardile vastavalt on minimaalne HVA suurus 0,5 x 0,5 m. Maksimaalne kahe mõõtmispunkti vaheline kaugus ongi 0,5 m ja seega tuleb mõõta ala kõigis nurkades nii horisontaal- kui ka vertikaalpolariseeritud signaaliga, kusjuures võimsus kõigis punktides peab jääma standardis lubatud piiridesse. Saatesignaal peab olema moduleerimata. Igas saateantenni asukohas on nõutud eraldi väljakalibratsioon.

Kalibreerimiseks on kaks põhilist meetodit:

- Konstantse väljatugevuse kalibratsiooni meetod (*constant field strength calibration method*)
- Konstantse võimsuse kalibratsiooni meetod (*constant power calibration method*).

Mõlemal juhul on vaja eelnevalt kalibreeritud sensorit, mis mõõdaks igas katsepunktis testitava sagedusvahemiku kindla sammuga sagedustel väljatugevust.

Esimese meetodi puhul on eesmärgiks HVA-s hoida konstantset väljatugevust, muutes vastavalt antenni saadetavat võimsust (*forward power*). Võimsuse väärtused igas punktis salvestatakse ja neid võrreldakse hiljem omavahel.

Teise meetodi puhul on antenni saadetav võimsus pidevalt sama, mõõdetakse väljatugevust HVA punktides ja võrreldakse tulemusi omavahel.

Käesoleva uurimistöö jooksul kasutati kalibratsiooniks konstantse võimsuse kalibratsiooni meetodit.

## 4. Katsete läbiviimine Tartu Observatooriumis

### Kasutatud seadmed

- Signaaligeneraator SMT 03, mis on võimeline genereerima signaali vahemikus 5 kHz – 3 GHz.<sup>[10]</sup>
- Isotroopne mõõteantenn TS EMF-B1, mis detekteerib keskkonnas leiduvaid kõrgsageduslikke (vahemikus 30 MHz – 3 GHz) elektromagnetvälju.<sup>[11]</sup>



Pilt 1: Mõõteantenn TS EMF-B1. Pildi autor: Viljo Allik.

- Elektromagnetilise häiringu mõõtevastuvõtja ja signaali/spektri analüsaator ESR-26, mille töösageduste vahemik on 10 Hz – 26,6 GHz.<sup>[12]</sup>
- Antenn HL562, bikoosilise ja logoperioodilise antenni kombinatsioon, mis töötab sagedusallas 30 MHz – 3 GHz. Katses kasutati seda saateantennina.<sup>[13]</sup>



Pilt 2: Antenn HL562, vertikaalpolarisatsiooni asendis.<sup>[14]</sup>

- Ruuporantenn HF907, mis töötab sagedusalas 0,8 GHz – 18 GHz. Katses kasutati seda saateantennina.<sup>[15]</sup>



Pilt 3: Antenn HF907, vertikaalpolarisatsiooni asendis.<sup>[16]</sup>

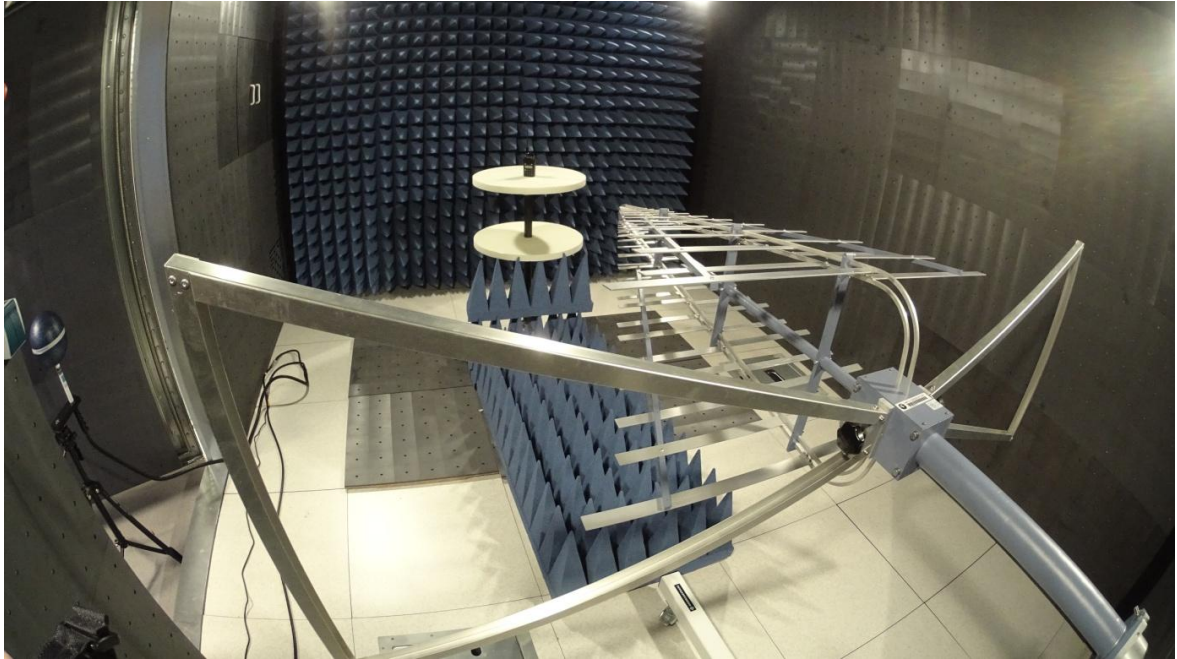
- Kalibreeritud ühenduskaablid: signaaligeneraatori ja kambri vahel kaabel nr 001, kambri ja saateantenni vahel kaabel nr 002, mõlema sumbuvus (signaali nõrgenemine levimisel) mõõdeti enne katsete sooritamist.

### Kajavaba kamber

Katsed toimusid Tartu Observatooriumi hiljuti valminud elektromagnetilise müra kindlas ruumis, ehk nn kajavabas kambris (*anechoic chamber*), milleks on firma Frankonia Group poolt toodetud nn ultrakompaktkamber (*Ultra Compact Chamber, UCC*). Kamber on elektromagnetiliselt väliskeskkonnast isoleeritud ning varjestab samas ka sees paiknevaid seadmeid. Niiskus- ja temperatuuritase vastavad rahvusvahelisele standardile IEC 61000-4-3. Ruumi suurus on ligikaudu 33 m<sup>3</sup>, põrandapinda ~13 m<sup>2</sup>. Tegu on väikseima võimaliku seda tüüpi ruumiga, kus on veel võimalused standardile<sup>[6]</sup> vastava 0,5 x 0,5 m suuruse homogeense välja ala tekitamiseks. Mõõtmisi viiakse läbi 1 m kaugusel sellest alast. Kambri lagi, seinad ja uks on täielikult kaetud ferriitplaatidega (tüüp F006), mis neelavad elektromagnetilist kiirgust. Lisaks on tagumine sein, mille ees on testimisala, kaetud hübriidmaterjalist (tüüp HF300) vahtkoonustega, mis neelavad kiirgust veelgi efektiivsemalt. Põrand on osaliselt kaetud ferriitplaatidega ning saateantenni ja testalal asuva vastuvõtuantenni vahele on paigutatud teisaldatavad hübriidmaterjalist plokid.<sup>[17]</sup>

Kamber on mõeldud erinevateks elektromagnetilise ühilduvuse ja antennide kiirgusmuutrite määramise testideks, objektide radari ristlõike mõõtmiseks ning seda saab kasutada ka lihtsalt varjestatud ruumina elektrijuhtivuse testide läbiviimiseks. Kamber on mõeldud töötama sagedusvahemikus 30 MHz – 18 GHz.<sup>[17]</sup>

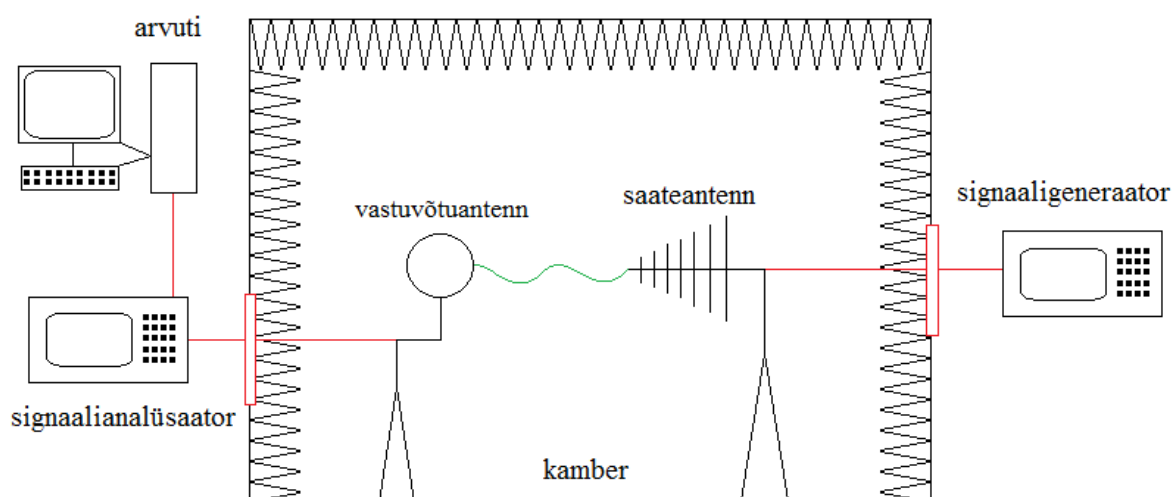
Testideks kasutatud ruum on näha Pildil 4. Selle esiplaanil on antenn HL562. Mõõtmisalas on mittejuhtivast materjalist alus, mille peale saab tulevikus asetada testitavad objektid. Kalibratsioonitestide ajaks teisaldati alus välja ja asendati pildi vasakul servas näha oleva vastuvõtva antenniga (sinine kera statiivi otsas, vt lähemalt Pilt 1). Pildistamise hetkel seisis statiiv ukseavas, testide ajal on uks suletud.



Pilt 4: Elektromagnetilise müra kindel ruum Tartu Observatooriumis. Pildi autor: Viljo Allik.

### **Katse ülesehitus**

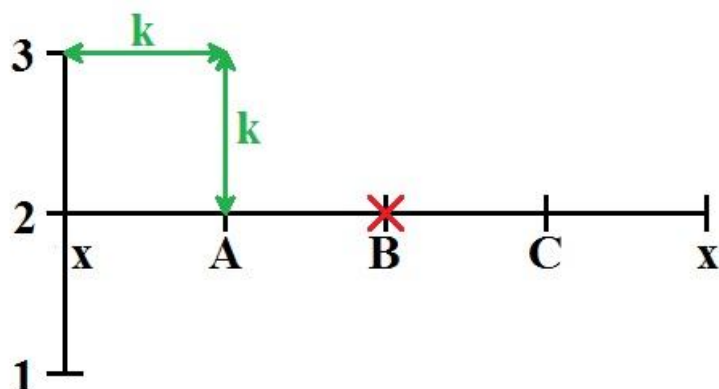
Katse lihtsustatud skeem on kujutatud Joonisel 2. Signaaligeneraatorist liigub signaal koaksiaalkaabli kaudu läbi kambri seina saateantenni. Sellest levib horisontaalselt või vertikaalselt polariseeritud elektromagnetlainet vastuvõtuantenni, mis mõõdab kõigis kolmes tasapinnas suunatud väljatugevust. Ideaaljuhul peaksid kambri seinad summutama kõik peegeldused ja vastuvõtuantenni peaks jõudma vaid otse saateantennist lähtuv kiirgus. Vastuvõetud signaal juhitakse koaksiaalkaabli kaudu edasi (spektri)analüsaatorisse, mis teisendab info signaali sagedusspektri kohta operaatorile sobivale kujule. Tulemused salvestatakse arvutisse tekstifailidesse. Katsete automatiseerimiseks kirjutati Pythonis (programmeerimiskeel) programm, mis juhib kõigi katseseadmete tööd, sh signaaligeneraatori väljundi sagedust ja võimsust ning salvestab tulemused tekstifaili. Manuaalselt tuli katsete vahepeal muuta saateantenni polarisatsiooni, kaugust, kõrgust, ning vastuvõtuantenni asukohta testruudustikus.



Joonis 2: Katse skeem.

Testitav ala on ruut küljepikkusega 0,5 m, mis on minimaalne rahvusvahelises standardis lubatud homogeense välja ala suurus<sup>[6]</sup>. Vajalik oli sooritada mõõtmisi ruudu kõigis neljas nurgas. Detailsemaks uurimiseks jagati katse käigus see ala veel omakorda neljaks võrdseks ruuduks, ning mõõtmisi sooritati iga ruudu tipus. Tekkis 3 x 3 mõõtmispunktiga ruudustik, mille tähistus on kujutatud Joonisel 3. Mõõdeti kolmel erineval kõrgusel vastavalt 1, 2 ja 3, ning kolmel erineval horisontaalsuunalise nihkega positsioonil vastavalt A, B ja C. Rahvusvahelisele standardile vastavuse testimiseks peab mõõtma punktides A1, C1, A3 ja C3. Saateantenn on suunatud punkti B2. Katse ajaks seati ruudustiku punktide asukohtade märkimiseks kambri tagaseina lähedale üles ajutine statsionaarne peenest nõõrist abivahend. X-tähtedega märgitud abipunktid asusid katseruudu servadest kummaldi pool 25 cm kaugusel ja neid kasutati kontrollina punktide taas paikasättimiseks juhul, kui vastuvõtuantenni pidevast liigutamisest mõni ruudustiku punkti tähis paigast nihkus.



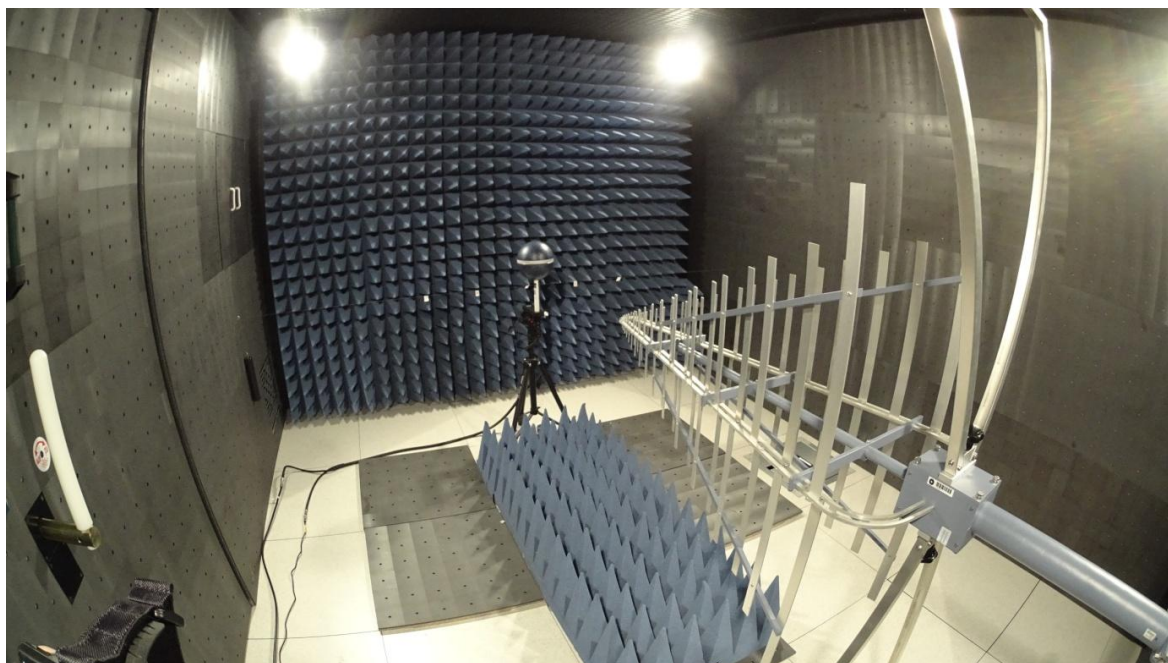


Joonis 3: Mõõtmispunktide asetus testitaval alal.

### Katsetingimused

Kummagi antenniga mõõdeti erinevas sagedusvahemikus. Üks mõõteseeria tähendab järjestikku mõõtmiste teostamist kogu sagedusvahemikus 5 MHz suuruse sammuga. Üks katseseeria tähendab kahe mõõteseeria (horisontaal- ja vertikaalpolariseeritud antenniga) läbimist igas mõõtmispunktis testitaval alal (vt Joonis 3), seega 9 punktis.

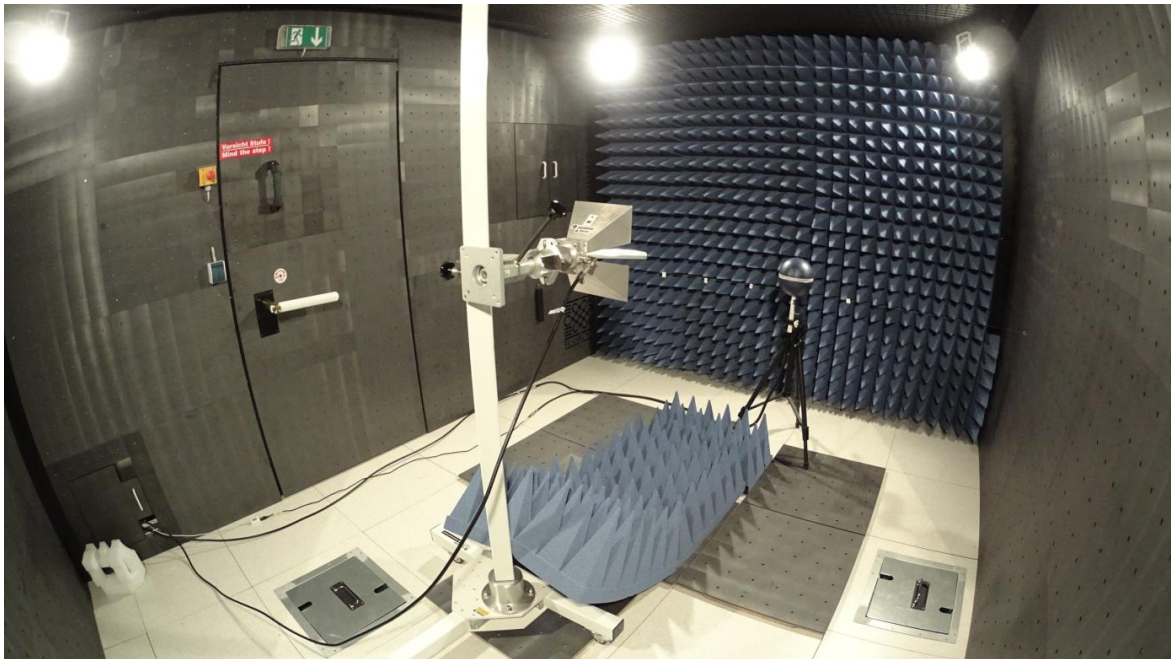
Antenniga HL562 mõõdeti sagedusvahemikus 30 MHz – 3 GHz, ehk kogu võimalikus töövahemikus. Kaugus vastuvõtjast antenni tipuni oli 1 m. Varieeriti antenni kõrgust, uurimaks, kas kaugus pörandast muudab vastuvõtuantenni jõudvate ebasoovitavate peegelduste hulka. Esimese mõõteseeria puhul oli antenni (tipu) kõrgus maapinnast 1 m, teisel juhul 1,2 m. Pilt 5 illustreerib mõõtmisi vertikaalpolariseeritud antenniga kõrgusel 1 m, vastuvõtuantenn on positsioonil B2.



Pilt 5: Mõõtmine antenniga HL562. Pildi autor: Viljo Allik

Antenniga HF907 viidi läbi testid sagedusvahemikus 1 GHz – 3 GHz, ülemise piiri määras vastuvõtuantenni kõrgeim võimalik töösagedus, alumise piiri antenni enda töösagedus (0,8 GHz, kuid praktilistel kaalutlustel alustati alles sagedusest 1 GHz).

Antenni kõrgus põrandapinnast oli 1 m, teostati kaks katseseeriat, esimene 1 m, teine 2,5 m kaugusel vastuvõtuantennist. Esimene seeria oli rahvusvahelisele standardile<sup>[6]</sup> ja testkambri spetsifikatsioonile<sup>[17]</sup> vastav, teine teaduslikust huvist ajendatud kambri piiride testimine. 2,5 m oli pikim võimalik kaugus vastuvõtjast, mis selle antenniga oli võimalik saavutada. Pildil 6 on näha mõõtmine HF907 antenniga kaugusel 1 m, vastuvõtuantenn on positsioonil C2.



Pilt 6: Mõõtmine antenniga HF907. Pildi autor: Viljo Allik

## 5. Tulemused

Mõõtmised viidi läbi jaanuarikuus 2015. aastal. Kokku testiti kahte erinevat antenni, kumbagi kahes erinevas asukohas, nii horisontaal- kui vertikaalpolariseeritud asendis ning mõõtmisi viidi läbi üheksas erinevas vastuvõtuantenni positsioonis. Iga positsiooni kohta on eraldi tekstifail andmetega, kus on vastavalt järjekorrale kirjas signaali sageduse väärtus megahertsides (MHz), signaalgeneraatorist antenni saadetud võimsus (dBm) (korrigeeritud kaablite sumbuvalt arvestades), vastuvõtuantenni poolt registreeritud x-, y- ja z-polariseeritud väljatugevuse väärtus ning ruutjuur viimase kolme väärtuse ruutude summast, ehk kogu väljatugevus. Ühikuks on kõigil neljal väärtusel detsibell-mikrovolti meetri kohta (dBuV/m).

Näidislõik andmefailist positsioonilt B2, horisontaalpolariseeritud HL562 antenni korral, alates sagedusest 1 GHz:

1000,11.03,103.156,123.473,113.063,123.888

1005,11.04,104.782,123.823,113.388,124.248

1010,11.04,105.019,123.919,113.823,124.375

1015,11.04,105.527,124.185,114.362,124.668

1020,11.05,106.689,124.419,114.844,124.939

1025,11.05,107.046,124.538,115.403,125.106

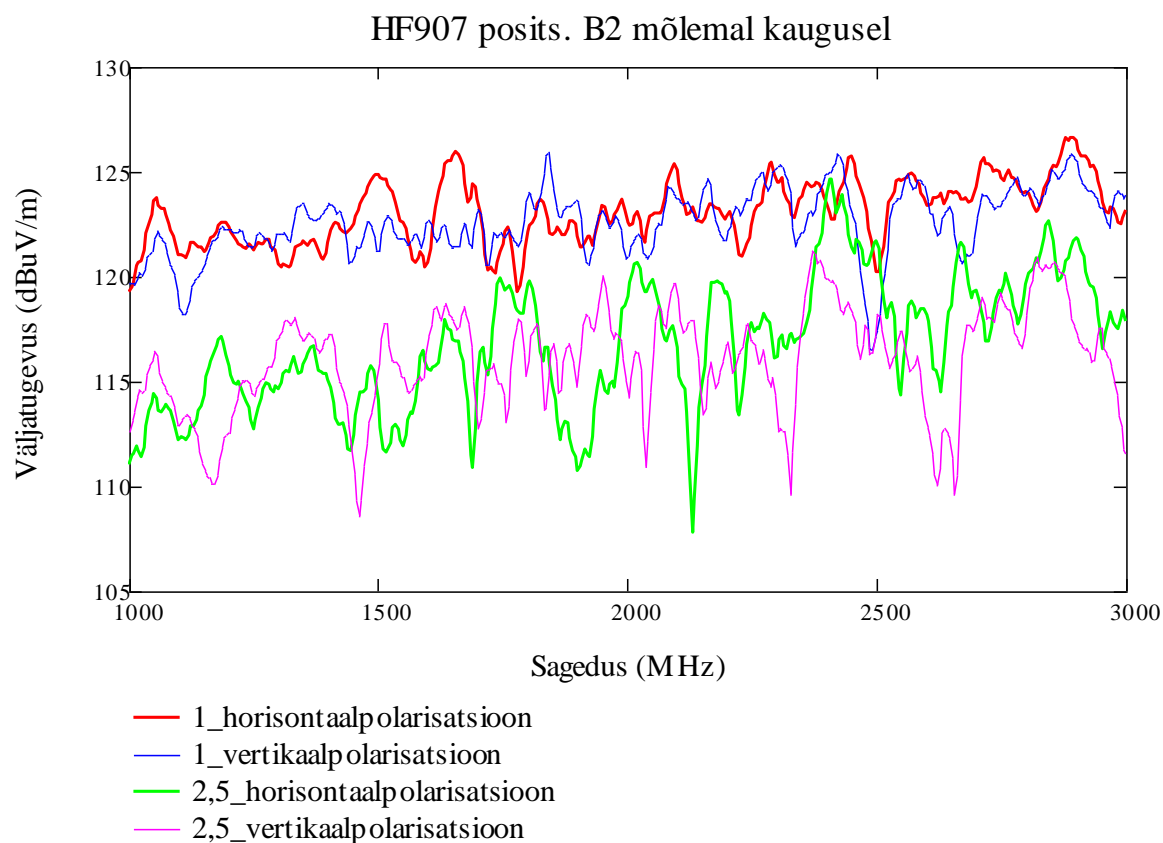
1030,11.05,107.849,124.609,115.764,125.222

1035,11.06,108.755,124.604,115.879,125.249

1040,11.06,109.592,124.843,115.939,125.483

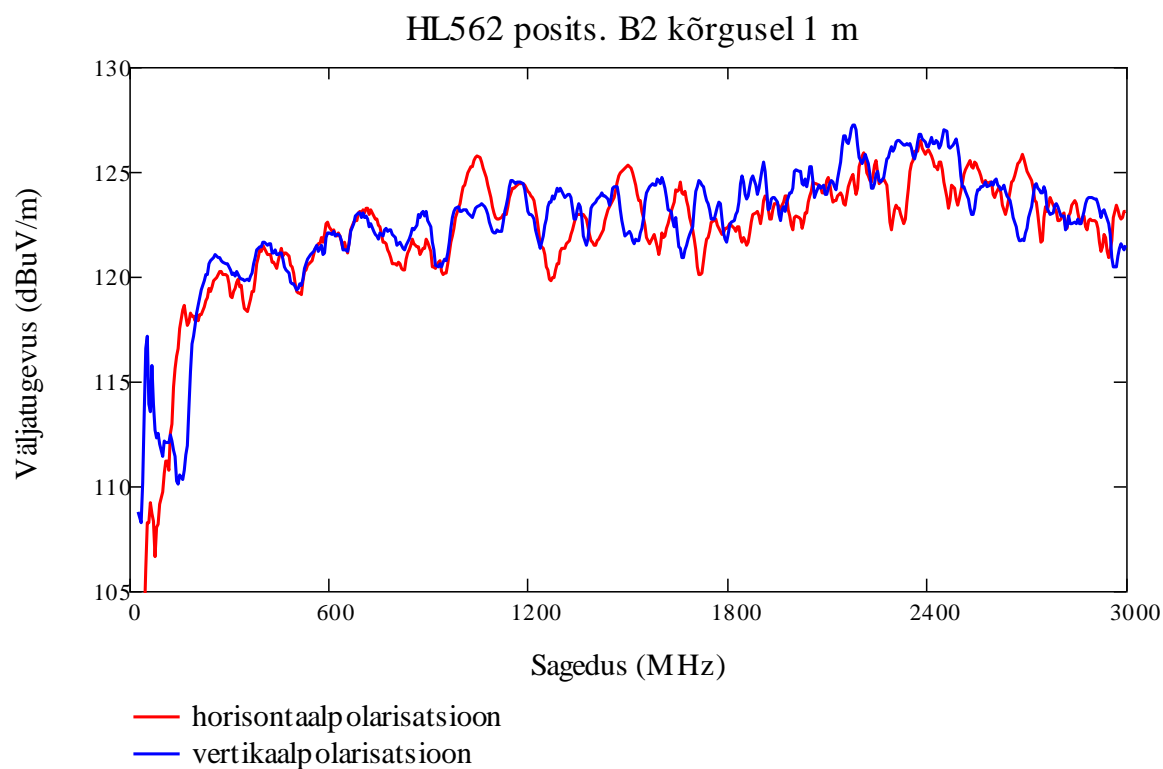
1045,11.06,110.382,125.075,115.704,125.680

Graafikul 1 on kujutatud elektromagnetvälja tugevus punktis B2 (ehk mõõtmisvälja keskel) nii 1 kui 2,5 meetri kaugusel asuva antenni HF907 horisontaal- ja vertikaalpolariseeritud asendi korral.

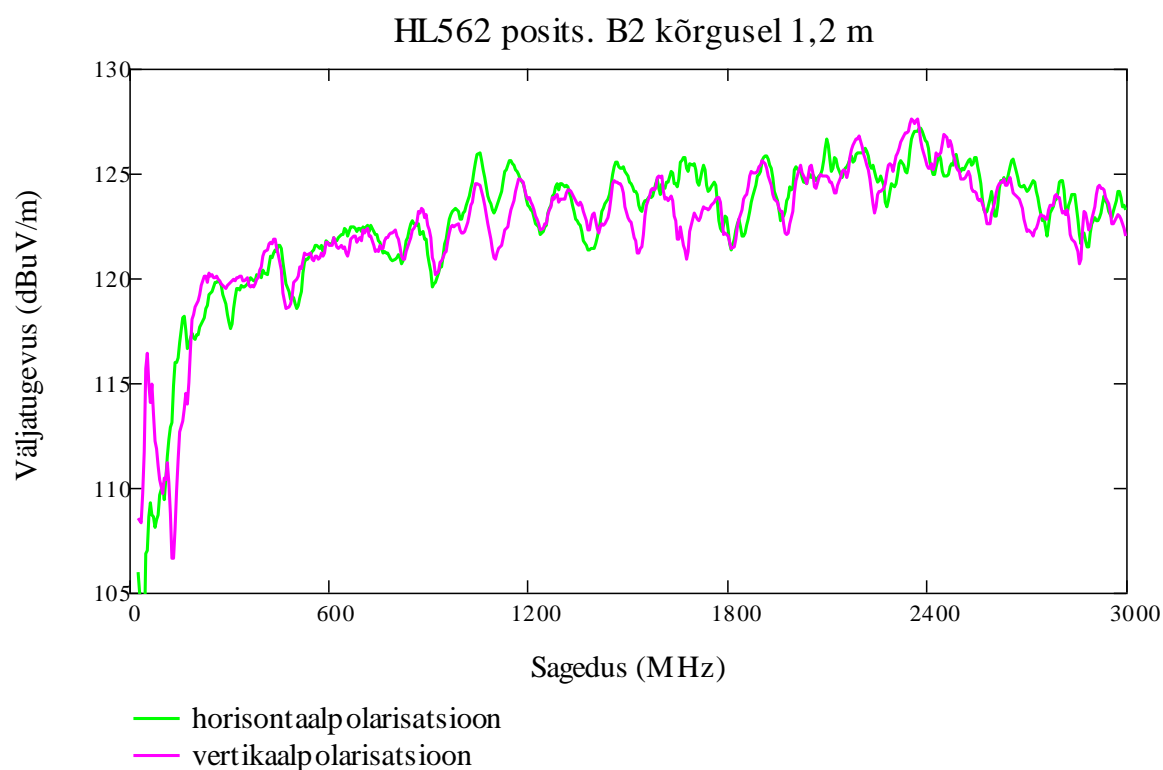


Graafik 1: väljatugevuse väärtused HF907 puhul punktis B2.

Graafikul 1 on näha, et väljatugevuse väärtus fluktuuerub kogu sagedusvahemiku ulatuses, aga 1 m kaugusel sooritatud mõõtmiste puhul on tuvastatavad ka sarnasused tulemuste käigus. Erinevused tulenevad antenni enda kiirgusomadustest ja mõõteantenni asukohast. Vaatamata kajavaba kambri kasutamisele võib arvestada ka teatud hulga peegeldustega kambri seintelt ja põrandalt, mis võivad tekitada interferentsi. 2,5 m kaugusel sooritatud mõõtmiste puhul on näha signaali nõrgenemine ning arvatavasti peegeldustest tingitud müra ja interferentsi mõjul signaali väärtuste suurem fluktuatsioon.



Graafik 2: väljatugevuse väärtused HL562 puhul 1 m kaugusel punktis B2.



Graafik 3: väljatugevuse väärtused HL562 puhul 1,2 m kaugusel punktis B2.

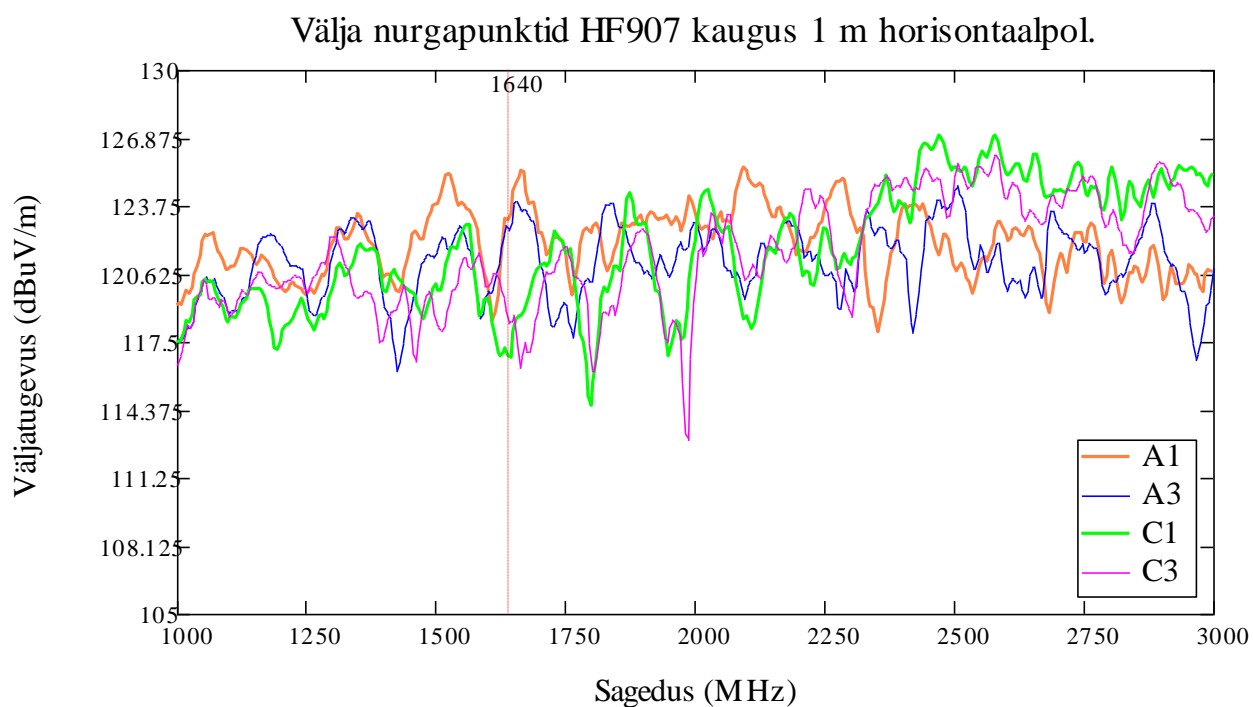
Graafik 2 ja 3 illustreerivad testi tulemusi antenniga HL562 vastavalt 1 ja 1,2 m kõrgusel põrandast. Y-telge on kärbitud ja esimesed, sagedusvahemiku alguses mõõdetud väga

madalad väärtused ei ole nähtavad, aga praegusel juhul ei ole need olulised. Mõlemal graafikul on näha erinevalt polariseeritud signaalide sarnane käik, seda eriti 1,2 m kõrguse antenni puhul. Põhjuseks on arvatavasti antenni enda paremad kiirgusomadused ja 1,2 m kõrguse puhul on vähem põrandalt tekkinud peegeldusi. Samuti on graafikutelt näha ühtlasem väljatugevuse väärtuste käik madalamatel sagedustel, kuni umbes 1 GHz-ni. See on tingitud ferriitplaatide omadusest toimida efektiivsete neelajatena kuni 1 GHz sagedusega kiirguste suhtes.

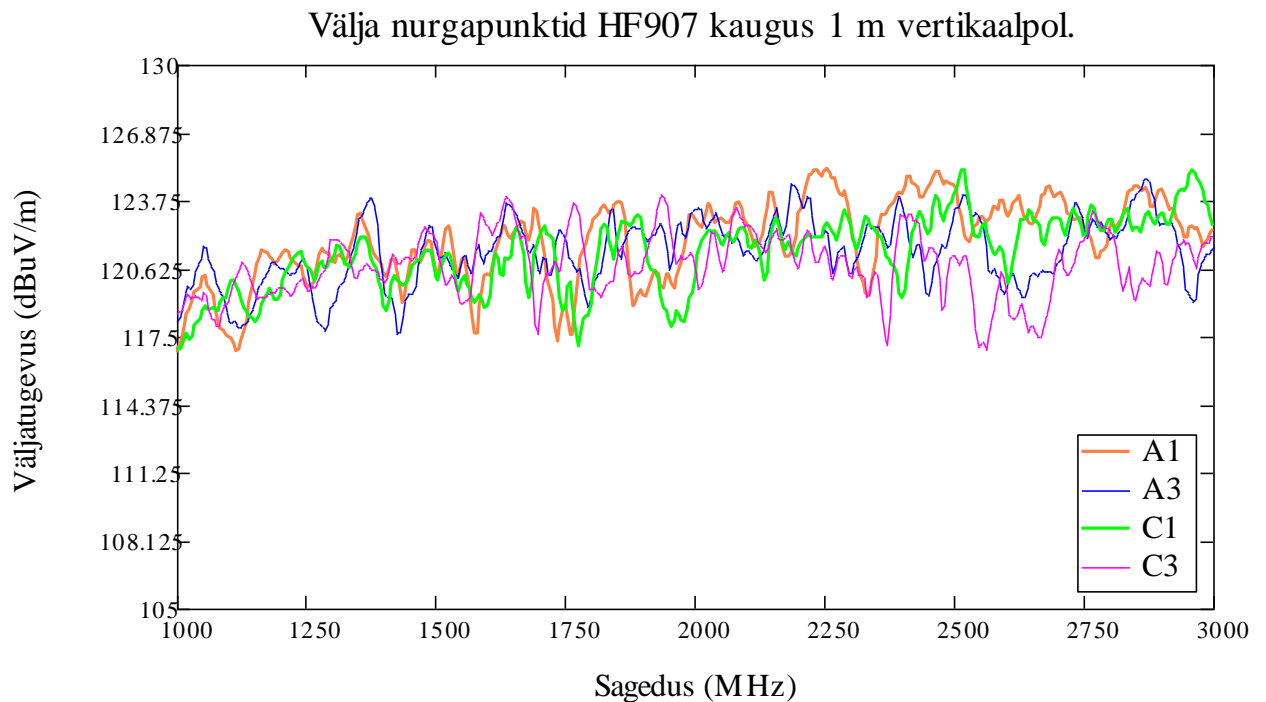
### Välja homogeensus

Pythonis kirjutati programm, mis võrdleb erinevate mõõtmispunktide sama sageduse korral mõõdetud väljatugevuse väärtuseid ning leiab, kui palju need teineteisest erinevad, ehk kui homogeenne väli mingil sagedusel on. Selleks eraldab programm igast etteantud failist sageduste ja summaarse väljatugevuse väärtuste tulbad järjenditesse ning seejärel võrdleb väljatugevuse järjendite samadel positsioonidel asuvaid väärtusi omavahel. Lubatud maksimaalne varieeruvus on kuni 6 dB. Kui vahe on võrdne või suurem kui lubatud väärtus, kirjutab programm vastava sageduse ning vahe eraldi tekstifaili ning arvutab kokku, mitu üle lubatud piiri läinud väärtust leidis.

- **HF907**



Graafik 4: Mõõtmistulemused homogeense välja nurkades antenni HF907 korral 1 m kaugusel horisontaalpolariseeritud signaaliga.



Graafik 5: Mõõtmistulemused homogeense välja nurkades antenni HF907 korral 1 m kaugusel vertikaalpolariseeritud signaaliga.

Graafikutel 4 ja 5 on vastavalt kujutatud horisontaal- ja vertikaalpolariseeritud antenn HF907-ga sooritatud testide tulemused mõõtevälja nurkades. Standardile<sup>[3]</sup> vastamiseks ei tohi nendes punktides mõõdetud välja võimsus sama sageduse korral erineda rohkem kui 6 dB.

Andmete analüüs näitas, et standardile mittevastavaid olukordi siiski leidis. Horisontaalpolariseeritud signaali korral (Graafik 4) oli selliseid mõõtesagedusi 42 ja vertikaalpolariseeritud signaali korral (Graafik 5) 6, kusjuures viimasel juhul on vahed väga napilt (alla 0,16 dB) üle lubatud piiri. Kõik sellised väärtused esinesid sagedustel üle 1,5 GHz. Horisontaalpolariseeritud signaali puhul on punase punktiirjoonega märgitud 9-punktilise (siin mõeldakse punktide all kindlat sagedust, millel mõõdetud väljatugevuse nelja väärtust võrreldakse) vahemiku algussagedus. Selles vahemikus (1,64 – 1,68 GHz) registreeriti mõõtevälja ülemises servas väga kõrgeid väärtusi ja alumises servas väga madalaid. Ülejäänud sagedusvahemikud, kus väli ei olnud piisavalt homogeenne, olid väiksemad, ulatudes kahest seitsme mõõtepunktiini.

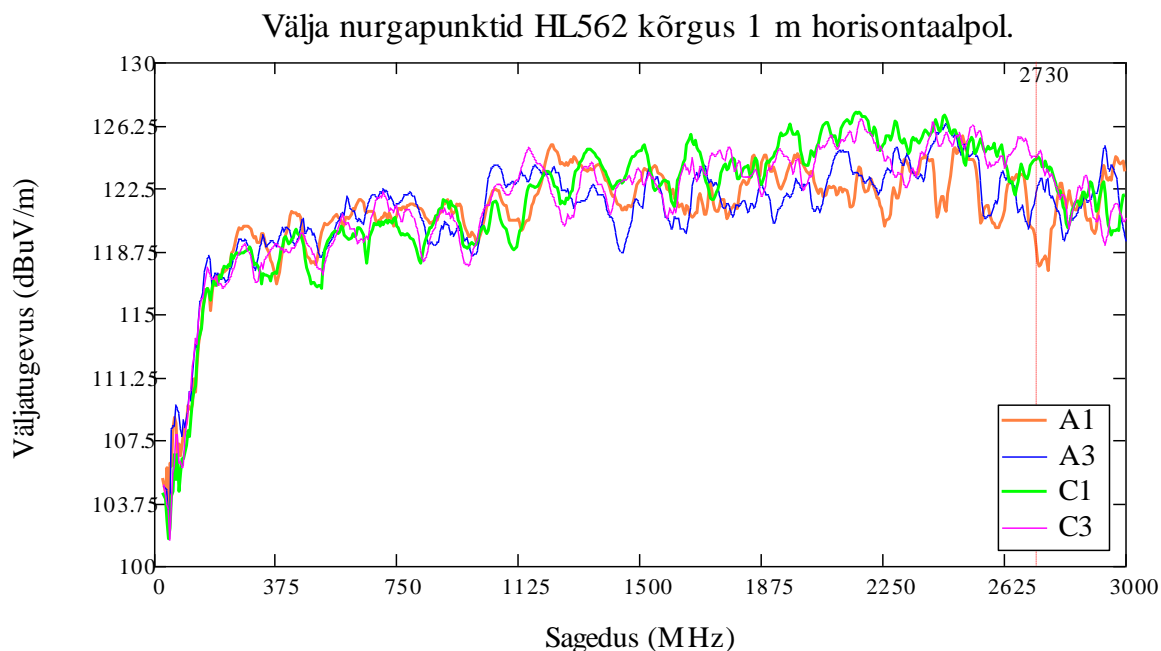
Kui võrdluseks oleks võetud kõik 9 vastuvõtuantenni asukoha mõõtmist, siis oleksid erinevused suuremad: horisontaalpolariseeritud signaali korral 94 tulemust ning vertikaalpolariseeritud signaali korral 44.

2,5 m kaugusel sooritatud mõõtmiste graafikuid ei tooda eraldi välja, sest nende puhul on homogeense välja tingimust rikkuvaid punkte veelgi rohkem – horisontaalpolariseeritud signaali korral 147 ja vertikaalpolariseeritud signaali puhul 117. Võrdluseks – kokku oli

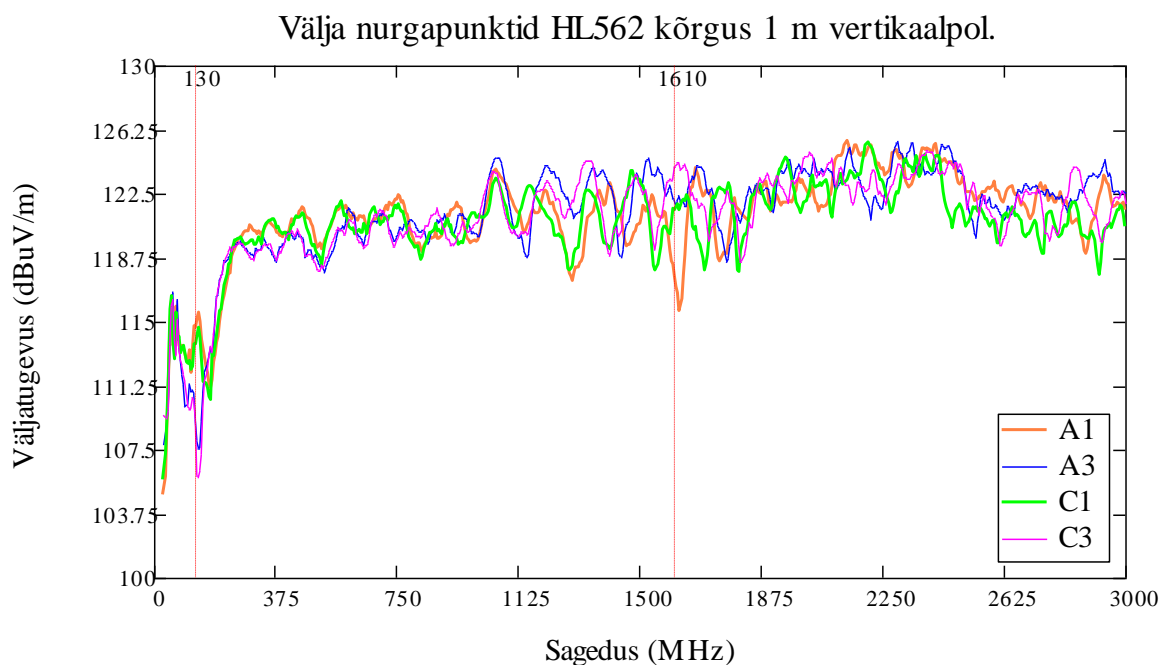


sagedusvahemik jagunenud 401 mõõtepunktiks. Tegemist ei ole kambri spetsifikatsioonidele vastavate mõõtetetingimustega, seega ei ole tulemus üllatav.

- **HL562**



Graafik 6: Mõõtmistulemused homogeense välja nurkades antenni HL562 korral 1 m kõrgusel horisontaalpolariseeritud signaaliga.

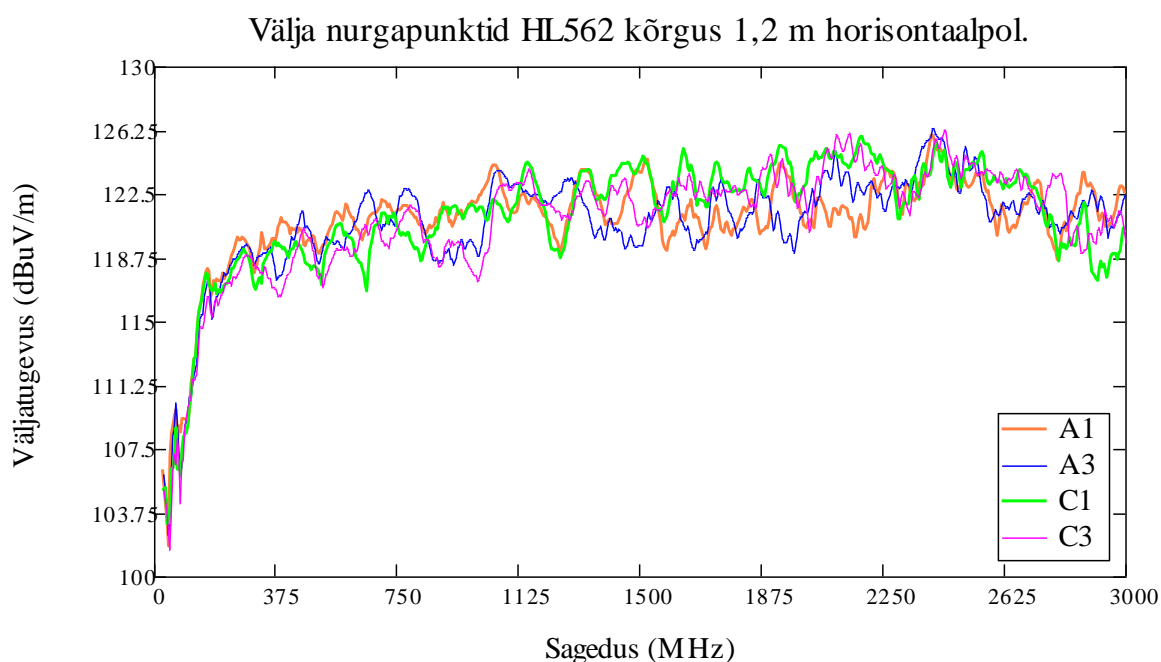


Graafik 7: Mõõtmistulemused homogeense välja nurkades antenni HL562 korral 1 m kõrgusel vertikaalpolariseeritud signaaliga.

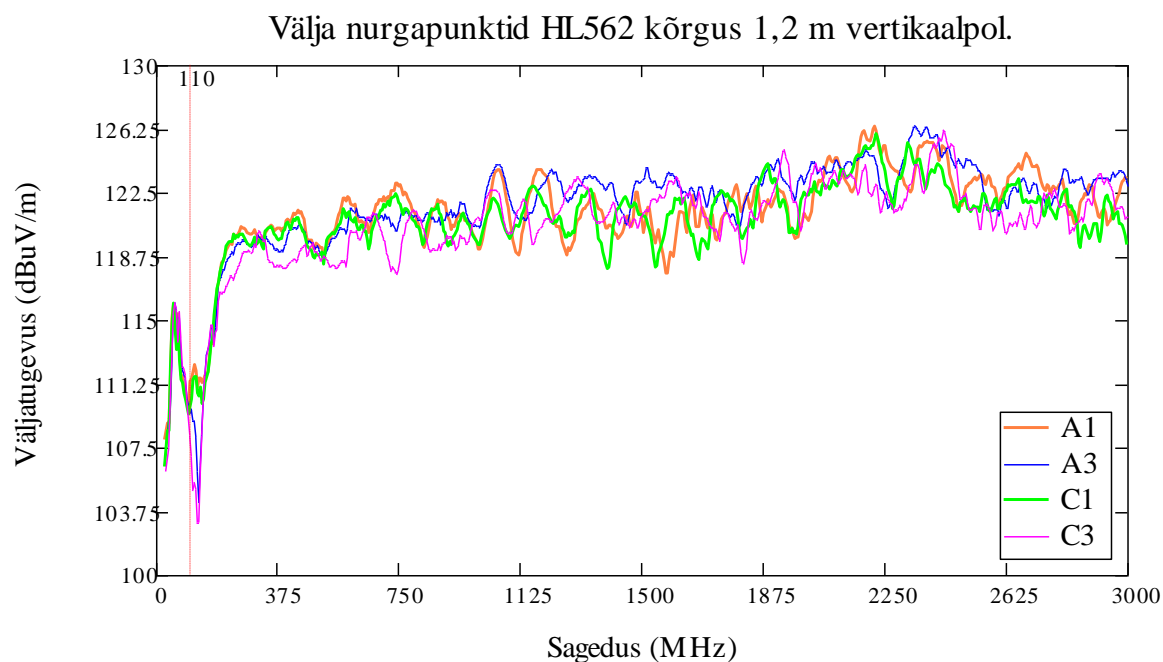


Graafik 6 ja 7 illustreerivad mõõtmistulemusi HL562 antenniga 1 m kõrgusel vastavalt horisontaal- ja vertikaalpolariseeritud signaaliga. Esimesel juhul oli kolm väärtust üle lubatud piiri, need kolm punkti olid järjestikku ning nende alguspunkt on märgitud punase punktiirjoonega Graafikul 6. Teisel juhul oli homogeense välja tingimuse rikkumisi kümnes punktis, vahemikes 130–145 MHz ning 1,61–1,635 GHz, mõlema vahemiku alguspunktid on märgitud Graafikul 7.

Tulemused on paremad ka kõigi 9 vastuvõtuantenni asukohapunkti võrdlemisel. Horisontaal- ja vertikaalpolariseeritud signaali korral on üle lubatud määra välja erinevusi vastavalt 8 ja 19.



Graafik 8: Mõõtmistulemused homogeense välja nurkades antenni HL562 korral 1,2 m kõrgusel horisontaalpolariseeritud signaaliga.



Graafik 9: Mõõtmistulemused homogeense välja nurkades antenni HL562 korral 1,2 m kõrgusel vertikaalpolariseeritud signaaliga.

Graafikutel 8 ja 9 on kujutatud mõõtmistulemused HL562 antenniga 1,2 m kõrgusel, vastavalt horisontaal- ja vertikaalpolariseeritud antenniga.

Horisontaalpolariseeritud antenniga 1,2 m kõrgusel mõõdetud tulemuste puhul oli homogeense välja nõue täielikult täidetud. Vertikaalpolariseeritud signaali korral oli mõõtmisvahemiku alguses vahemikus 110–130 MHz 5 punktiline vahemik, kus välja homogeensuse tingimus ei kehtinud. Selle perioodi alguspunkt on märgitud punase punktiirjoonega.

9 mõõtepunkti võrdluse korral oli lubatud piiri ületavaid väärtusi vastavalt 24 ja 15 punktis.

1,2 meetri kõrgusel asuva saateantenniga mõõtmised võimaldasid võrrelda, kas põrandast tekkinud peegeldused häirivad signaali levikut märgatavalt, sest homogeense välja alumine piir asub tegelikult 75 cm kõrgusel põrandast, mitte 80 cm, nagu standardis on nõutud. Tulemuste põhjal on näha, et toorelt arve võrreldes võimaldasid kõrgemal sooritatud mõõtmised (4 vastuvõtuantenni asukohapunkti põhjal koostatud võrdluses) tekitada veidi homogeensemaja välja, kuid mitte märgatavalt. Seega võib oletada, et põrandalt lähtuvad kiirguse peegeldused on sama efektiivselt elimineeritud mõlemal juhul.

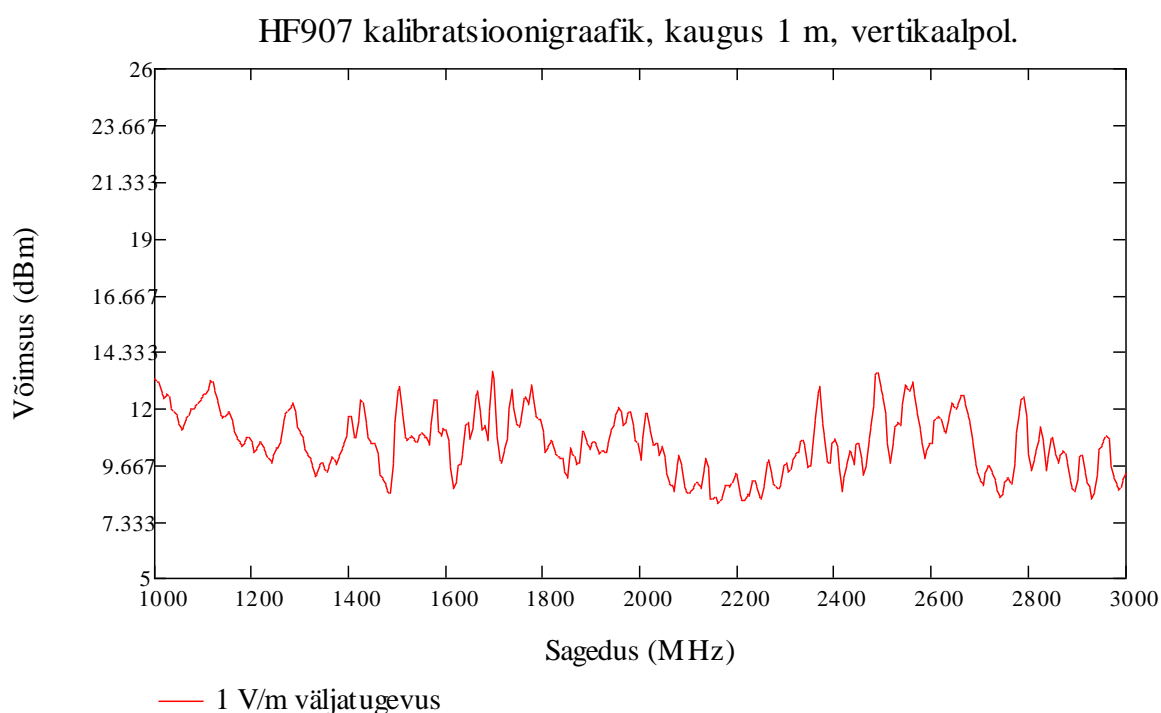
Viimaselt neljalt graafikult on näha, et väli on homogeensem ligikaudu vahemikus 300 MHz – 1 GHz, tingituna antenni töövahemikust ning ferriitneelajate iseloomust.

### Antennide kalibreerimine

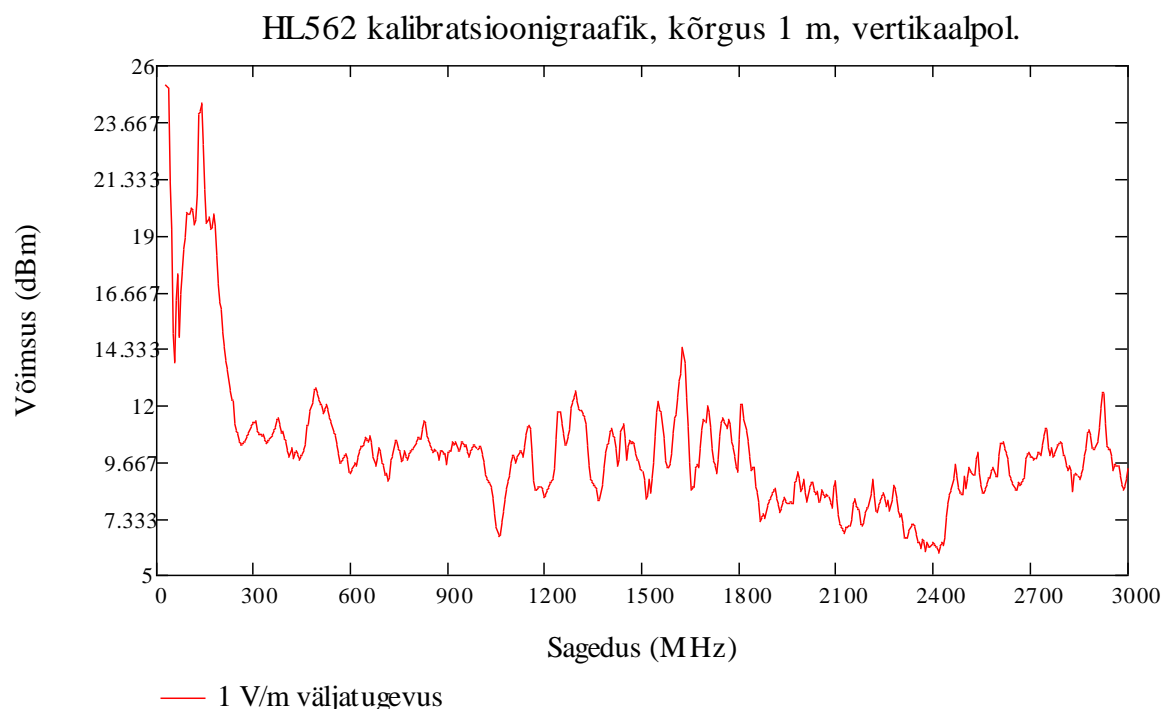
Antenni saadetud kõrgsagedusliku võimsuse ja vastuvõtuantennis registreeritud väljatugevuse kaudu on võimalik välja arvutada väljatugevuse ja antenni saadetud

võimsuse seos. Selle põhjal saab arvutada soovitud väljatugevusele vastava võimsuste väärtuste tabeli. Tabelis vastab erinevatele sageduse väärtustele võimsuse väärtus, mis tuleks antenni saadetavale võimsusele juurde lisada, et saavutada soovitud väljatugevus. Iga väljatugevuse jaoks genereeritakse uus tabel.

Tulemuseks on spetsiaalselt Tartu Observatooriumi mõõtekambri tingimustele vastavad kalibratsioonikõverad erinevate väljatugevuste jaoks erinevates tingimustes (saateantenni asukohad ja polarisatsioon). Kalibratsioonitabeli koostamiseks kasutati kõikide mõõtmispunktide (kokku 9) seas kõige väiksemat väljatugevuse väärtust, et igas mõõtmispunktis oleks kalibreeritud signaali korral kindlustatud vähemalt minimaalne soovitud väljatugevus. Tulemuste visualiseerimiseks kanti need graafikutele, ehkki antenni võimendi hakkab neid kasutama tekstifaili kujul.



Graafik 10: Näide HF907 vertikaalpolarisatsiooni kalibratsioonikõverast.



Graafik 11: Näide HL562 vertikaalpolarisatsiooni kalibratsioonikõverast.

Graafik 10 ja 11 on toodud näiteks, milline on kalibratsioonikõvera käik HF907 ja HL562 antenni puhul. Mõlemale graafikule kanti 1 V pinge kalibratsioonikõverad.

### Mõõtevigade suurusjärgud

Mõõtevead on enamjaolt tingitud mõõteaparatuuri enda ebatäpsusest. Seadmete ebatäpsus on kindlaks määratud tootja poolt. Järgnevalt on toodud kasutatud mõõteseadmete hinnangulised ebatäpsused vastavalt seadme spetsifikatsioonidele.

Antenn HF907 kõige lähemate katsetingimustega (1 m kauguselt mõõdetud js 3 m kõrgusel maapinnast) hinnatud mõõtmisviga on  $\pm 1$  dB, milles sisaldub antenni faktor ning kiirgusefektiivsus (*antenna gain*).<sup>[18]</sup>

Antenni HL562 mõõtmisviga sagedusel 30–150 MHz on  $\pm 1,5$  dB ning kõrgematel sagedustel  $\pm 1$  dB.<sup>[19]</sup>

Signaaligeneraatori mõõteviga sõltub genereeritava signaali sagedusest: sageduse ( $f$ )  $< 1,5$  GHz puhul on viga  $\pm 1$  dB ning  $1,5 \text{ GHz} < f < 3 \text{ GHz}$  puhul  $\pm 1,5$  dB.<sup>[20]</sup>

Vastuvõtuantenni mõõteviga sõltub signaali sagedusest. Alla 0,9 GHz korral on viga  $\pm 3,1$  dB; 0,9 GHz puhul  $\pm 2,3$  dB ning 1,8 GHz juures  $\pm 2,8$  dB.<sup>[21]</sup>

Spektrianalüsaatori mõõteviga sõltub mitmest parameetrist ning arvutatakse valemiga:  $\pm(\text{markeri sagedus} \times \text{tugisageduse täpsus (reference uncertainty, ei ole teiste parameetrite kõrval arvestatava suurus)} + 10\% \times \text{filtri ribalaius} + 0,5 \text{ (sageduse skanneerimisulatus (span)/(mõõtepunktide arv - 1))} + 1 \text{ Hz}$ .<sup>[22]</sup>

Mõõtmiste läbiviijast tingitud mõõteviga võib seisneda manuaalselt vastuvõtuantenni positsioonide vahetamises. Antenni ruumis ümberpaigutamise viga hinnati maksimaalselt  $\pm 1$  cm.

Kahjuks ei ole kasutatud standardi dokumentatsioonis välja toodud lubatud distantsti täpsust. Näiteks Euroopas kehtivas kosmosetehnoloogiale kehtestatud standardis<sup>[23]</sup> on selliste testide puhul lubatud viga kuni  $\pm 5\%$ . See tähendab, et kui ka sooritatud testide puhul hinnata maksimaalset mõõteviga samas suurusjärgus, siis jääb läbiviijast tingitud viga lubatud piiridesse.

## 6. Arutelu

Tulemuste põhjal peab tunnistama, et enamjaolt ei olnud homogeense välja ala tingimus täielikult täidetud, ehkki kõigi antenni positsioonide korral peale ühe oli tegu 0-3% hulga probleemsete punktidega kogu sagedusvahemikus. Probleemi vältimiseks on soovitatav vähendada võimalusel (sõltuvalt testobjekti mõõtmetest) homogeense välja ala proportsioone, sest standardile mittevastavate tulemuste põhjal oli näha, et põhjuseks oli enamasti vaid ühe mõõtepunkti tulemuste märgatav erinevus ülejäänud välja alal sooritatud mõõtmistest.

Antennide kalibratsioonitabelid on välja arvutatud spetsiaalselt Tartu Observatooriumi kajavaba kambri mõõtetetingimustele ja peaksid seega olema edaspidi suureks abiks antennide väljundsignaali võimsuse määramisel. Tabelid vastavad küsimusele, millist võimsust on vaja mingi tugevusega elektromagnetvälja tekitamiseks teatud sagedusel. Edasi peaks tabelid integreerima signaalivõimendit juhtivasse programmi, et signaali korrigeerimine oleks võimalikult automaatne.

Testide tulemuste põhjal ei saa välja tuua kindlat probleemset ala testvälja ulatuses, mille tulemused on teiste välja osadega konstantselt märgatavalt erinevad, mis laseks eeldada, et üheski ruumi osas oleks probleem kambri kiirgustsummutavate omadustega. Tulemused kinnitasid, et kambri varjestusmaterjal ferriit neelab kiirgust paremini sagedustel, mis jäävad alla 1 GHz. Kambri põrand, mis on kaetud teisaldatavate püramiidneelajate plokkidega oli piisavalt varjestatud, sest testid põrandale lähemal (ka 5 cm lähemal, kui standardile vastamiseks lubatud oleks) ja kaugemal antenniga HL562 ei võimaldanud välja tuua mingeid silmapaistvaid erinevusi mõõdetud homogeense välja alas. Üks võimalus, mida võiks tulevikus veelgi täpsemate testide tarbeks uurida, oleks paigutada saateantenn kambri seinte suhtes mitteparalleelselt. See võiks teoreetiliselt vähendada võimalike sümmeetriliste peegelduste mõju.

## 7. Kokkuvõte

Elektromagnetilise ühilduvuse uurimisvaldkond on kiiresti arenev ja pidevalt täienev, sest inimest peaaegu igal sammul ümbritsev elektroonika on loonud uutmoodi sfääri – elektromagnetilise keskkonna. Kahjuks kaasneb sellega ka vastav reostus. Elektromagnetilise ühilduvuse uurimisvaldkonna eesmärgiks on tagada elektromagnetilise keskkonna ohutus kõigile ja kõigele, kes selles keskkonnas funktsioneerima peavad.

Käesolevas töös anti ülevaade valdkonna olulisematest teemadest ja katse lahtiseletamiseks vajalikest mõistetest ning kirjeldati IEC 61000-4-3 standardi nõudeid. Töö praktilises osas kirjeldati katsete ülesehitust ja anti ülevaade mõõtmistulemustest. Andmeanalüüsi lihtsustamiseks kasutati tekstifaile töötlevaid programme, mille kirjutamiseks kasutati programmeerimiskeelt Python.

Tartu Observatooriumi kajavaba kambri testimise eesmärgiks oli uurida selles sooritatavate mõõtmiste võimalikku täpsust ja vastavust standardile. Tulemused näitasid, et kõigis katsetes ei olnud mõõtevälja homogeensus kogu ulatuses alati tagatud.

Töö eesmärgid:

- Kajavaba kambri testimine – kontrollida, kas kiirguse summutamise võime vastab tootja poolt kinnitatud parameetritele
- Antennide HL562 ja HF907 kalibreerimine
- Võimalusel parimate mõõtetetingimuste väljaselgitamine.

Said täide viidud ja tulemused analüüsitud.

Elektromagnetilise keskkonna uuringud alles seavad sisse oma kohta Eesti teadusmaastikul ja autori arvates võiks seda teemat käsitleda ka Tartu Ülikooli keskkonnatehnoloogia eriala õppekavas. Tartu Observatooriumi laborisse installeeritud kamber panustab loodetavasti antud valdkonna edendamisse ka Tartu Ülikoolis.

## **8. Tänuõnad**

Töö autor soovib südamest tänada Tartu Observatooriumi poolset juhendajat Viljo Allikut, kes näitas üles erakordset kannatlikkust kõigile küsimustele (mõnele kaks ja ka kolm korda) vastamises ning aitas autoril orienteeruda esialgu täiesti võõras teemas ja allikmaterjalides. Samuti kuulub autori tänu töö ülikoolipoolsele juhendajale Mart Noormale, keskkonnatehnoloogia programmijuhile Margit Kõivule ja Karin Tuvikesele nende vastutulelikkuse ja abistamise eest.

Lõpuks edastab autor oma tänuõnad ka oma perekonnale ja sõpradele, kes töö valmimise ajal olid toeks ja julgustuseks.



## 9. Kasutatud kirjanduse loetelu

1. J. Järvik, A. J. Schwab, A. A. Voroševski, *Elektromagnetiline ühilduvus I* (Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, Tallinn, 2008).
2. C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility* (Wiley, New York, 1992).
3. Virtuaalne füüsikaliste suuruste ja valemite andmebaas RapidTables <http://www.rapidtables.com/> viimati külastatud: 18.05.2015.
4. EMÜ-alane valemitekogu "EMC Related Formulae" <http://emc.topruder.com/formulas2.pdf> viimati külastatud: 18.05.2015.
5. Antennifaktori definitsioon ja valemid <http://www.antenna-theory.com/definitions/antennafactor.php> viimati külastatud: 18.05.2015.
6. Rahvusvahelise Elektrotehnika Komisjoni standard 61000-4-3 *Electromagnetic Compatibility (EMC) – part 4-3: Testing and measurement techniques – radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*, (kolmas väljaanne, 2006).
7. K. Shimada, T. Hayashi, M. Tokuda, "Fully Compact Anechoic Chamber using the Pyramidal Ferrite Absorber for Immunity Test" kogumikus *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (IEEE, Washington, DC, 2000), lk. 225–230.
8. Toote leht "Ferrite absorbers – general description" [http://www.frankoniagroup.com/downloads/Anechoic\\_Chambers/ferrite\\_absorbers\\_description.pdf](http://www.frankoniagroup.com/downloads/Anechoic_Chambers/ferrite_absorbers_description.pdf) viimati külastatud: 18.05.2015.
9. Toote leht: "Hybrid absorbers – general description" [http://www.frankoniagroup.com/downloads/Anechoic\\_Chambers/hybrid\\_absorbers\\_description.pdf](http://www.frankoniagroup.com/downloads/Anechoic_Chambers/hybrid_absorbers_description.pdf) viimati külastatud: 18.05.2015.
10. Toote leht "R&S® SMT Signal Generator" [http://www.rohde-schwarz.com/en/product/smt-productstartpage\\_63493-7568.html](http://www.rohde-schwarz.com/en/product/smt-productstartpage_63493-7568.html) viimati külastatud: 11.05.2015.
11. Toote leht "R&S® TS-EMF EMF Measurement System" [http://www.rohde-schwarz.com/en/product/ts-emf-productstartpage\\_63493-8174.html](http://www.rohde-schwarz.com/en/product/ts-emf-productstartpage_63493-8174.html) viimati külastatud: 11.05.2015.
12. Toote leht "R&S® ESR EMI Test Receiver" [http://www.rohde-schwarz.com/en/product/esr-productstartpage\\_63493-17877.html](http://www.rohde-schwarz.com/en/product/esr-productstartpage_63493-17877.html) viimati külastatud: 11.05.2015.

13. Toote lühitutvustus "R&S<sup>®</sup>HL562 ULTRALOG Antenna - brief description English" [http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/HL562\\_catalog\\_2013\\_98\\_99.pdf](http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/HL562_catalog_2013_98_99.pdf) viimati külastatud: 11.05.2015.
14. Toote leht "R&S<sup>®</sup>HL562 Antenna" [http://www.rohde-schwarz.com/en/product/hl562-productstartpage\\_63493-8697.html](http://www.rohde-schwarz.com/en/product/hl562-productstartpage_63493-8697.html) viimati külastatud: 11.05.2015.
15. Käsiraamat R&S<sup>®</sup>HF907 *Double-Ridged Horn Antenna. Manual* (Saksamaa, 2011).
16. Toote leht "R&S<sup>®</sup>HF907 Antenna" [http://www.rohde-schwarz.com/en/product/hf907-productstartpage\\_63493-7982.html](http://www.rohde-schwarz.com/en/product/hf907-productstartpage_63493-7982.html) viimati külastatud: 11.05.2015.
17. Toote lühitutvustus "Ultra Compact Chamber - UCC" [http://www.frankoniagroup.com/downloads/Anechoic\\_Chambers/UCC.pdf](http://www.frankoniagroup.com/downloads/Anechoic_Chambers/UCC.pdf) viimati külastatud: 11.05.2015.
18. Toote HF907 andmeleht nr 4070.7000.02 (Rohde&Schwarz, 2014).
19. Toote HL562 andmeleht nr 4041.3000.02 (Rohde&Schwarz, 2013).
20. Toote SMT03 andmeleht <http://www.testequipmenthq.com/datasheets/Rohde-Schwarz-SMT06-Datasheet.pdf> viimati külastatud: 18.05.2015.
21. Toote TS-EMF brošüür [http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/TS-EMF\\_dat\\_en\\_0758-2777-12\\_v0400.pdf](http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/TS-EMF_dat_en_0758-2777-12_v0400.pdf) viimati külastatud: 18.05.2015.
22. Toote EMI vastuvõtja andmeleht versioon 02.00 (Rohde&Schwarz, 2013) [http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/ESR\\_dat-sw\\_en\\_3606-7201-22\\_V0200.pdf](http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ESR_dat-sw_en_3606-7201-22_V0200.pdf) viimati külastatud: 18.05.2015.
23. Euroopa kosmosevaldkonna standardiseerimiskomisjoni (*European Cooperation for Space Standardization*) standard ECSS-E-ST-20-07C *Space Engineering – Electromagnetic compatibility*, (esimene parandatud väljaanne, 2012)

## **10. Anechoic chamber calibration in Tartu Observatory**

Kerli Prants

### **Summary**

The modern day environment goes hand in hand with all kinds of technological devices meant to ease our lives. The electromagnetic environment created by these devices might not be seen, heard or felt but can cause a lot of damage to other devices and human health. This is why electromagnetic compatibility (EMC) is a fast-developing, heavily-monitored subject in electronics industry and science. Before it can join the ever-increasing number of appliances in a given environment, a device must be tested and proved to be safe for use.

Tartu Observatory recently installed an anechoic chamber intended for electromagnetic environment testing. Before it can be used for scientific or commercial activities it must be tested to make sure any future experiments can be conducted with the required precision. The chamber has to comply with international EMC standards, more specifically with International Electrotechnical Commissions's International standard for EMC.

The purpose of this work was to prepare the anechoic chamber for EMC measurements by carrying out tests with a calibrated receiver antenna. This enables to measure the field strength in certain positions in the test area, assess the field uniformity throughout the 0,5 x 0,5 m test area, the absorptive properties of the room and the quality of the tests. Calibration tables with correcting antenna power factor were composed of calculation results.

Tests were carried out with two antennas: a combination of biconical and log-periodic antenna HL562 and a double-ridged waveguide horn antenna HF907 both in two different locations with two differently polarized positions.

The results show in most cases the uniform field area requirement is fulfilled. In the worst case, in about 10% of the points in measured frequency range the uniform field area condition was not met. In all other cases this number was 0-3%. The easiest certain solution to this problem is to use slightly smaller testing area because the results proved that when comparing all four points usually only one measurement point value notably differentiated from others. The tests closer to the floor (closer than allowed in the international standard) when compared to those farther away have no significant differences meaning the floor of the semi-anechoic measurement chamber has been effectively covered by radiation absorbent material blocs.

A program with which to create calibration tables for desired field strength was created. The tables are intended specifically for local test conditions.

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Kerli Prants,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

"Tartu Observatooriumi kajavaba kambri kalibratsioonimõõtmised",

mille juhendajad on Viljo Allik ja Mart Noorma,

- 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **18.05.2015**